

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung****Aktenzeichen:**

102 60 728.1

Anmeldetag:

23. Dezember 2002

Anmelder/Inhaber:

Bruker BioSpin GmbH, Rheinstetten/DE

Bezeichnung:Verfahren zur Berechnung des Leiterverlaufs eines
Supraleiters vom Spulenkörper zum Joint sowie zu-
gehörige Vorrichtungen**IPC:**

H 01 F 6/06

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 7. Oktober 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Scholz

Anmelder:

Stuttgart, den 20.12.2002

P8100 B/P

5 Bruker Biospin GmbH
Silberstreifen
76287 Rheinstetten


10

Vertreter:


Kohler Schmid + Partner
Patentanwälte GbR
15 Ruppmannstraße 27
D-70565 Stuttgart

20

**Verfahren zur Berechnung des Leiterverlaufs eines Supraleiters vom
Spulenkörper zum Joint sowie zugehörige Vorrichtungen**


25 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Berechnung des räumlichen Verlaufs
eines bandförmigen Supraleiters einer Spulensektion einer Hochfeld-
Magnetspule in einem Überführungsbereich von der Spulensektion weg oder
in die Spulensektion hinein, wobei die Spulensektion solenoidförmig auf
einem zylindrischen Spulenkörper gewickelt ist.

30

Eine Hochfeld-Magnetspule mit üblicher Leiterführung ist beispielsweise aus der Handreichung der TU München "Supraleitende Magnete für die NMR-Spektroskopie" von Rainer Haeßner, URL:

<http://www.org.chemie.tu-muenchen.de/people/rh/nmrueb/magnet2.pdf>

5 (Stand: 21.12.2001) aus den Abbildungen 2 und 5 bekannt.

Zur Erzeugung höchster Magnetfeldstärken, insbesondere für NMR (Kernspin-Resonanz) Anwendungen werden supraleitfähige Magnetspulen eingesetzt. Supraleiter können innerhalb gewisser Temperatur-,

10 Magnetfeldstärken- und Stromstärkenbereiche elektrischen Strom verlustfrei tragen und damit sehr konstante Magnetfelder erzeugen. Besonders vorteilhaft für den Magnetbau sind Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL), d.h. Supraleiter mit einer Sprungtemperatur oberhalb des Siedepunkts von flüssigem Stickstoff. Sie können besonders große Magnetfeldstärken
15 erzeugen.

Eine bei HTSL übliche Gestalt von Supraleitern im Magnetbau ist bandförmig, insbesondere mit rechteckigem Querschnitt. Diese lässt sich relativ leicht herstellen und verarbeiten.

20

Ein großes Problem im Magnetbau sind Übergangsstellen (Joints) von einem supraleitenden Leiterabschnitt zu einem anderen. Diese Joints können in der Regel nicht den gleichen hohen Magnetfeldstärken ausgesetzt werden wie die normalen Leiterabschnitte. Daher versucht man, die Joints weit entfernt vom
25 Zentrum der Magnetspule in einem Bereich niedriger Magnetfeldstärke anzuordnen.

Dies kann dann schwierig zu realisieren sein, wenn bei solenoidförmigen Spulenwicklungen aufgrund von radial weiter außen gelegenen, die
30 Spulenwicklung axial überragenden Spulenabschnitten eine tangentiale Wegführung (d.h. tangential zur Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers und näherungsweise senkrecht zur Zylinderachse) des bandförmigen

Supraleiters von der Spulenwicklung geometrisch nicht möglich oder aus anderen Gründen unerwünscht ist.

Bei der Verwendung von duktilen, flexiblen Supraleiterdrähten kann der Leiter
 5 am Ende eines Wicklungsabschnitts einer solenoidförmigen Spulenwicklung relativ scharf abgebogen und in axialer Richtung von der Spulenwicklung weg beliebig weit herausgeführt werden. Ein Joint kann dann an einem praktisch magnetfeldfreien Ort angeordnet werden.

10 Hochtemperatursupraleiter (und andere unflexible Supraleitermaterialien) lassen solche scharfen Biegungen aber nicht zu. Bei solenoidförmigen HTSL-Spulenwicklungen müssen die Joints daher am oberen oder unteren Rand der Spulenwicklung angeordnet werden, wo zwar noch erhebliche Magnetfelder herrschen, die aber wenigstens niedriger sind als im Zentralbereich der
 15 Spulenwicklung. Der an einem solchen Joint an die solenoidförmige Spulenwicklung angeschlossene supraleitende Leiterabschnitt wird dann parallel zur Zylinderachse des Spulenkörpers aus dem Bereich hoher Magnetfeldstärke herausgeführt, vgl. Haeßner, aaO. Diese Joints am Rand der Spulenwicklung begrenzen für viele Anwendungen die Leistungsfähigkeit der
 20 gesamten Magnetspule.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, bei Verwendung von nicht flexiblen, bandförmigem Supraleitermaterial, insbesondere HTSL-Material, einen räumlichen Verlauf eines bandförmigen Supraleiters aufzuzeigen, durch den
 25 eine Leiterführung zu oder von einer solenoidförmigen Spulensektion in axialer Richtung in kompakter Bauweise ohne Joints ermöglicht wird und so die Leistungsfähigkeit einer Hochfeld-Magnetspule gesteigert werden kann.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren der eingangs vorgestellten Art
 30 dadurch gelöst, dass der bandförmige Supraleiter im Überführungsbereich von einer ersten Orientierung tangential flach anliegend an der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers und näherungsweise senkrecht zur

Längsrichtung des zylindrischen Spulenkörpers verlaufend entlang einer Bahnkurve in eine zweite Orientierung mit seiner Schmalseite auf der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers stehend und parallel zur Längsrichtung verlaufend übergeführt wird oder umgekehrt,

5 und dass aus der Integro-Differentialgleichung

$$\frac{z''(u)}{(1+z'(u)^2)^{3/2}} = \frac{\sin(\tau \int_0^u \sqrt{1+z'(\hat{u})^2} d\hat{u})}{r_{\min}}$$

die Bahnkurve $z(u)$ bestimmt wird,

wobei z die Koordinate des bandförmigen Supraleiters in Längsrichtung des Spulenkörpers und u die Umfangskoordinate des bandförmigen Supraleiters

10 ist, wobei \hat{u} eine Hilfskoordinate darstellt, τ eine über die Länge des bandförmigen Supraleiters im Überführungsbereich konstante Torsion bezeichnet, und r_{\min} den minimalen Biegeradius des bandförmigen Supraleiters über seine breite Seite bezeichnet, und wobei die Position ($z=0$, $u=0$) einem Randpunkt des Überführungsbereichs zugeordnet ist.

15

Die Apostrophen ' indizieren jeweils die Ableitung, also etwa $z'(u)=dz/du$.

Das Verfahren geht davon aus, dass der bandförmige Supraleiter mit rechteckigem Querschnitt über seine breite Seite bis zum minimalen Biegeradius r_{\min} gebogen und in Längsrichtung mit τ (Einheit: Winkel pro Länge) tordiert werden kann, nicht aber um seine schmale Seite gebogen werden kann. Das Ergebnis der Bahnkurve $z(u)$ kann als Diagramm dargestellt werden, wobei die Kurve typischerweise bei $z=u=0$ startet und bei einem bestimmten u -Wert eine Asymptote aufweist. Bei diesem u -Wert hat
 20 der bandförmige Supraleiter seine axiale Ausrichtung erreicht und braucht nicht weiter gebogen zu werden. Die axiale Richtung wird dabei mit dem auf dem zylindrischen Spulenkörper stehenden bandförmigen Supraleiter, d.h. ohne merkliche Vergrößerung des Platzbedarfs über den Radius des zylindrischen Spulenkörpers hinaus, erreicht. Der Raum von etwaigen weiter
 25 außen liegenden Spulensektionen oder anderen geometrischen
 30

Hindernissen wird nicht verletzt. Durch die Berücksichtigung des minimalen Biegradus besteht auch nicht die Gefahr einer Beschädigung des Supraleiters. Vielmehr wird der bei der vorgegebenen Torsion kompakter mögliche Verlauf des bandförmigen Supraleiters bestimmt. Dies ist
 5 besonders wichtig, wenn an einem Ende einer Spulenwicklung mehrere axiale Leiterabschnitte, etwa für Stromzu- und Abführung vorgesehen sind. Hierbei ist eine Kreuzung der Leiterabschnitte zu vermeiden, d.h. die Überführung von azimuthalem Verlauf in axialen Verlauf muss auf möglichst kleinem Raum, bevorzugt innerhalb eines halben Umfangs, erreicht werden.

10



Ganz besonders bevorzugt ist eine erfindungsgemäße Verfahrensvariante, bei der der Winkel φ zwischen der flachen Seite des bandförmigen Supraleiters und der lokalen Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers bestimmt wird gemäß

15
$$\varphi(u) = \tau \int_0^u d\hat{u} \sqrt{1 + z'(\hat{u})^2} \quad .$$
 Durch Kenntnis dieses Zusammenhangs kann die

vorausgesetzte konstante Torsion im Überführungsbereich besonders einfach eingehalten werden, indem nämlich die Neigung gegen den Untergrund (d.h. den zylindrischen Spulenkörper bzw. eine etwaige dort vorgesehene entsprechende Nut) bestimmt wird.

20



Ebenso ganz besonders bevorzugt ist eine Verfahrensvariante, bei der als τ die maximal erlaubte Torsion τ_{\max} des bandförmigen Supraleiters eingesetzt wird. In diesem Fall kann der Bandleiter schnellstmöglich von einer tangentialen Position in eine auf dem zylindrischen Spulenkörper senkrecht
 25 stehende Position überführt werden. In der senkrecht stehenden Position kommt die Biegung des bandförmigen Supraleiters direkt der Zuwendung zum axialen Verlauf zugute. Der Raum, innerhalb dessen der axiale Leiterverlauf erreicht wird, ist dann minimal.

30 In einer bevorzugten Verfahrensvariante erfolgt die Bestimmung der Bahnkurve $z(u)$ und/oder die Bestimmung des Winkelverlaufs $\varphi(u)$ mit

numerischen Methoden. Numerische Methoden sind einfacher zu realisieren als analytische Methoden. Die Rechengenauigkeit kann den Erfordernissen des Einzelfalls angepasst werden.

- 5 Eine andere, bevorzugte erfindungsgemäße Verfahrensvariante sieht vor, dass als Anfangsbedingungen $z(0)=0$ und $z'(0)=0$ gewählt werden. Mit $z'(0)=0$ nimmt man an, dass die Steigung der Spulenwicklung am Beginn des Überführungsbereichs vernachlässigbar ist. Diese realistische Näherung vereinfacht die Berechnung von $z(u)$.

10

- Ganz besonders bevorzugt ist eine Verfahrensvariante, bei der der minimale Biegeradius r_{\min} des bandförmigen Supraleiters über seine breite Seite mit einem Sicherheitsfaktor $S1$ multipliziert wird, insbesondere $S1 \leq 1,2$, und/oder dass die maximal erlaubte Torsion τ_{\max} mit einem Sicherheitsfaktor
- 15 $S2$ multipliziert wird, insbesondere $S2 \geq 0,8$. Kleine Fehler in der Umsetzung des berechneten Verlaufs des Bandleiters in der Realität führen dann nicht zu einem fatalen Unter- bzw. Überschreiten der Materialgrenzwerte r_{\min} bzw. τ_{\max} und damit auch zu keinem Materialversagen. Eine Abweichung der Leiterführungsparameter z , u , φ von
- 20 bis zu etwa 20% vom berechneten Wert können bei Werten von $S1 = 1,20$ und $S2 = 0,80$ noch hingenommen werden.

- In den Rahmen der vorliegenden Erfindung fällt auch eine Hochfeld-Magnetspule mit mindestens einer Spulensektion, wobei die Spulensektion
- 25 mit einem bandförmigen Supraleiter solenoidförmig auf einem zylindrischen Spulenkörper gewickelt ist, die dadurch gekennzeichnet ist, dass der bandförmige Supraleiter mindestens einen Überführungsbereich aufweist, in welchem er von einer ersten Orientierung tangential flach anliegend an der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers und näherungsweise senkrecht
- 30 zur Längsrichtung des zylindrischen Spulenkörpers verlaufend entlang einer Bahnkurve in eine zweite Orientierung mit seiner Schmalseite auf der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers stehend und parallel zur

Längsrichtung verlaufend übergeführt wird und/oder umgekehrt. Bei dieser Bauweise entfällt die Notwendigkeit für einen Joint im Randbereich der Spulensektion, um die Spulensektion aus axialer Richtung (entlang der Achse des zylindrischen Spulenkörpers) kommend zu kontaktieren.

5

Ganz besonders bevorzugt ist eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule, bei der der Verlauf des bandförmigen Supraleiters näherungsweise einer mittels einem der oben dargestellten erfindungsgemäßen Verfahren berechneten Bahnkurve $z(u)$ bzw. dem berechneten Winkelverlauf $\varphi(u)$ entspricht. In diesem Fall wird der benötigte Raum für die Überführung des bandförmigen Supraleiters von der azimuthalen, ersten Orientierung in die axiale, zweite Orientierung besonders klein.

10

15 Ebenso ganz besonders bevorzugt wird eine Ausführungsform, bei der der Verlauf des bandförmigen Supraleiters fixiert ist, vorzugsweise durch eine Nut im zylindrischen Spulenkörper, insbesondere im Überführungsbereich. Der bandförmige Supraleiter liegt in der Nut flach an. Dadurch wird die Materialbelastung im Falle von Krafteinwirkungen (etwa magnetischen Kräften beim Aufladen der Spulensektion) verringert. Außerdem ist der bandförmige Supraleiter leicht orientierungsgenau erfindungsgemäß zu platzieren und zu arretieren. Die Anordnung kann anschließend vergossen werden.

20

25 Besonders bevorzugt wird auch eine Ausführungsform, bei welcher der Boden der Führungsnut nicht der Verdrehung des Bandes folgt, sondern auf der Oberfläche eines Zylinders verläuft. Eine solche Nut ist fertigungstechnisch wesentlich einfacher zu realisieren als eine Nut mit abkippendem Boden. Die Nut folgt dabei wieder der nach dem erfindungsgemäßen Verfahren berechneten Kurvenverlauf. Der bandförmige Supraleiter wird nun gleichmäßig in dieser Nut verlegt. Durch die inneren Spannungen, die dabei im Leitungsband auftreten, stellt sich automatisch ein Verlauf mit konstanter

30

Torsion ein, so dass das Band wieder näherungsweise dem erfindungsgemäß berechneten Verlauf folgt. Durch anschließenden Verguss der Nut wird für eine Arretierung des Bandes in dieser Lage gesorgt.

- 5 Eine besonders vorteilhafte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule sieht vor, dass der bandförmige Supraleiter einen Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) umfasst. In diesem Fall können keine scharfen Biegungen des bandförmigen Supraleiters realisiert werden, und die erfindungsgemäße Lehre ist die einzige Methode, um Joints aus dem
- 10 Bereich erheblichen Magnetfelds fernzuhalten, wenn eine tangentielle Wegführung des Leiters senkrecht zur Zylinderachse geometrisch ausgeschlossen ist.

- Bei einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule
- 15 umfasst die Hochfeld-Magnetspule mindestens eine weitere, radial weiter außen gelegene Spulensektion. Dies ist der häufigste und wichtigste Fall eines oben erwähnten geometrischen Hindernisses.

- Bei einer Weiterbildung dieser Ausführungsform, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die radial äußere(n) Spulensektion(en) die radial innere(n) Spulensektion(en) jeweils in axialer Richtung überragt/überragen, kommen die Vorteile der Erfindung besonders gut zur Geltung. Die überragende äußere Spulensektion schließt eine tangentielle Wegführung des bandförmigen Supraleiters senkrecht zur Zylinderachse aus.

- 25 Bei einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule ist der minimal zulässige Biegeradius r_{\min} des bandförmigen Supraleiters von der Größenordnung des Radius r_0 des zylindrischen Spulenkörpers der radial innersten Spulensektion. Dadurch ist die
- 30 Spulengeometrie bestmöglich an sprödes Supraleitermaterial angepasst, und spröde HTSL-Materialien in der erfindungsgemäßen Spulengeometrie zur Erzeugung höchster Magnetfeldstärken können optimal genutzt werden.

Bei einer weiteren, bevorzugten Ausführungsform ist die Hochfeld-Magnetspule zur Erzeugung einer magnetischen Induktionsstärke > 20 T ausgelegt. Dadurch werden einer NMR-Messung, die ein Magnetfeld der Hochfeld-Magnetspule nutzt, gute Auflösungsvermögen zugänglich.

Eine Ausführungsform sieht vor, dass die Betriebstemperatur etwa gleich oder kleiner 4 K, insbesondere etwa 2 K ist. Diese tiefe Betriebstemperatur gestattet die Verwendung hoher Magnetfeldstärken, so dass der Vorteil der erfindungsgemäßen Geometrie, welche unter anderem die Joints in einen Bereich niedriger Magnetfeldstärke führt, voll zur Geltung kommt.

Vorteilhaft ist weiterhin eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule, bei der alle Spulensektionen in Serie geschaltet sind. Diese Schaltung ist besonders einfach.

Eine Ausführungsform sieht vor, dass im Betrieb alle Spulensektionen im Dauerstrommodus betrieben werden, und zwar entweder alle gemeinsam in Serie oder einzeln bzw. in Gruppen zusammengefasst. Dieser Betrieb im „persistent mode“ ermöglicht eine besonders gute zeitliche Stabilität des Magnetfeldes, dass Rauscheinflüsse und Instabilitäten des Netzgeräts entfallen. Eine Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Leiter und die Joints hinreichend verlustfrei funktionieren, wozu ja die erfindungsgemäße Auslegung beiträgt.

Eine weitere vorteilhafte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Spulensektionen, die keine HTSL enthalten, in Serie geschaltet sind und ggf. im Dauerstrommodus betrieben werden können. Dies fasst einen Teil der Spulenanordnung sinnvoll und auf einfache Weise elektrisch zusammen.

Eine Weiterbildung dieser Ausführungsform sieht vor, dass eine Vorrichtung vorgesehen ist, um die den HTSL enthaltende Spulensektion mit einem separatem Netzgerät zu betreiben. Dieses Netzgerät kann dann an den Erfordernissen allein dieser Sektion ausgerichtet werden. Auch hier ist optional
5 ein separater Dauerstrommodus vorgesehen.

Ebenso in den Rahmen der Erfindung fällt ein supraleitfähige Leiterstrukturen umfassendes NMR (=Kernspinresonanz) - Hochfeld - Magnetspulensystem zur Erzeugung eines extrem homogenen und zeitlich
10 extrem stabilen Magnetfelds B_0 in einem Messvolumen, das dadurch gekennzeichnet ist, dass das Magnetspulensystem eine erfindungsgemäße Hochfeld-Magnetspule umfasst. In der NMR kommt es besonders auf Driftfreiheit bei hohen Magnetfeldstärken an, die durch eine kompakte Spulenanordnung erzielt werden können, so dass hier die Vermeidung von
15 Joints im Bereich erheblicher Magnetfeldstärken besonders vorteilhaft ist.

Zur Erfindung gehört weiterhin eine Vorrichtung zur Herstellung einer erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule entsprechend einem erfindungsgemäßen oben beschriebenen Berechnungsverfahren, die
20 dadurch gekennzeichnet ist, dass die Vorrichtung einen Computer zur Berechnung des Verlaufs des bandförmigen Supraleiters umfasst.

Eine vorteilhafte Weiterbildung dieser Vorrichtung sieht vor, dass eine Fräs- oder Erosionseinrichtung zur computergesteuerten Erzeugung der Nut im
25 zylindrischen Spulenkörper vorgesehen ist. Dadurch kann die Nut besonders exakt entsprechend der Berechnung eingerichtet werden.

Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter
30 ausgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu

verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1: z-u-Diagramm eines Bandverlaufs für $t=360^\circ/1000\text{mm}$,
 $r_{\min}=100\text{mm}$;

10 Fig. 2: eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Berechnung einer Bahnkurve einer Leiterführung bezieht sich auf ein flaches Hochtemperatursupraleitungsband
 15 rechteckigen Querschnitts mit den folgenden Biegeparametern:

- minimaler Biegeradius über die breite Seite: r_{\min}
- sehr großer (d.h. unendlicher) minimaler Biegeradius um die schmale Seite
- maximal erlaubte Torsion: τ_{\max}

20 Das Band sei auf einen Spulenkörper bis zu einem Radius $r_0 \geq r_{\min}$ aufgewickelt und soll nun auf dem Zylindermantel (Radius r_0) von der azimuthalen in die axiale Richtung ohne Überschreitung der Biegeparameter überführt werden. Bezeichnet z die axiale Koordinate und u die Umfangskoordinate, so beschreibt das Band eine Kurve $z(u)$ auf der Zylindermantelfläche. Um das Band aus der
 25 azimuthalen Richtung herausdrehen zu können, muss es zunächst aufgerichtet werden, da eine Biegung um die schmale Seite nicht, oder nur sehr langsam möglich ist. Je weiter das Band aufgerichtet ist, desto stärker kann es in der u - z -Ebene gekrümmt werden. Steht es senkrecht auf der u - z -Ebene, so ist in dieser der minimale Biegeradius r_{\min} erlaubt. Bezeichnet φ den Winkel zwischen
 30 der breiten Seite des Bandes und der u - z -Ebene, so ergibt sich der in dieser erlaubte minimale Biegeradius als Projektion des mit minimalem Radius um die breite Seite gebogenen Bandes auf die u - z -Ebene:

$$r = \frac{r_{\min}}{\sin \varphi}$$

Geht man von einer gleichmäßigen Torsion des Bandes mit fortschreitender Länge aus, also

$$\varphi(l) = \tau l$$

- 5 wobei l die aktuelle Länge des Bandes bezeichne und $\tau \leq \tau_{\max}$ gelte, so ergibt sich für den Verlauf des Leiters eine Grenzkurve mit einer maximalen Krümmung von

$$\kappa(l) = \frac{1}{r} = \frac{\sin(\tau l)}{r_{\min}}$$

Unter Benutzung der Beziehungen

$$l = \int_0^u d\hat{u} \sqrt{1 + z'(\hat{u})^2} \quad (\text{Bronstein S.315 und S.590})$$

$$10 \quad \kappa = \frac{z''(u)}{(1 + z'(u)^2)^{3/2}}$$

gelangt man zu folgender Integro-Differentialgleichung für die Bahnkurve des Bandes:

$$\frac{z''(u)}{(1 + z'(u)^2)^{3/2}} = \frac{\sin(\tau \int_0^u d\hat{u} \sqrt{1 + z'(\hat{u})^2})}{r_{\min}}$$

- Der Zustand des Bandes am Ende der Spulenwicklung führt zu folgenden Anfangsbedingungen (es sei denn, es werden bewusst andere Verhältnisse eingestellt):

$$z(0) = 0, z'(0) = 0$$

Die Differentialgleichung kann mit gängigen numerischen Methoden gelöst werden.

20

Hierzu ein Beispiel: Für ein Band mit einem minimalen Biegeradius von $r_{\min}=100\text{mm}$, das sich mit einer konstanten Torsion von $\tau=360^\circ/1000\text{mm}$ aufrichtet, wurde die in **Fig. 1** dargestellte Bahnkurve numerisch berechnet. Bei einem u -Wert der Umfangskoordinate von etwa 190mm geht der z -Wert der axialen Koordinate (Längskoordinate) asymptotisch gegen unendlich. Das

25

heißt, Änderungen im z-Wert können ohne Änderung des u-Werts erfolgen. Ein Herausführen des Leiters in axialer z-Richtung ist möglich, ohne weiter um den Zylindermantel herumwickeln zu müssen. Damit ist der Leiter an dieser Stelle axial orientiert.

5

Wird das Band auf einem Zylindermantel mit einem Radius r_0 von 120 mm verlegt, so benötigt man zur Überführung von der azimuthalen in die axiale Richtung etwa eine viertel Umdrehung.

- 10 In **Fig. 2** ist schematisch ein Randabschnitt einer erfindungsgemäßen Hochfeld-Magnetspule 1 mit einer solenoidförmigen Spulensektion dargestellt. Auf einem zylindrischen Spulenkörper 2 ist ein bandförmiger Supraleiter 3 aufgewickelt. Die Windungen des bandförmigen Supraleiters 3 bilden einen Elektromagneten. In einer ersten Orientierung 3a ist der bandförmige
- 15 Supraleiter 3 azimuthal orientiert, d.h. flach auf dem zylindrischen Spulenkörper 1 anliegend und (bei geringer Steigung) annähernd senkrecht zu einer Achse z des zylindrischen Spulenkörpers 2 orientiert. Der größte Teil der Spulensektion der Hochfeld-Magnetspule 1 ist in dieser Weise gewickelt. Von einem ersten Randpunkt 4a an beginnt der bandförmige Supraleiter 3 sich aufzurichten. Der
- 20 Winkel φ zwischen breiter Seite des bandförmigen Supraleiters 3 und der unmittelbar darunter befindlichen Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers 2 nimmt vom ersten Randpunkt 4a an von 0° allmählich auf schließlich 90° an einem zweiten Randpunkt 4b zu. Gleichzeitig erfolgt eine Umorientierung der Verlaufsrichtung des bandförmigen Supraleiters 3 von einer Richtung
- 25 annähernd senkrecht zur z-Richtung hin zu einer Orientierung parallel zur z-Richtung. Ab dem zweiten Randpunkt 4b nimmt der bandförmige Supraleiter 3 dann eine axiale, zweite Orientierung 3b parallel zur z-Achse und senkrecht auf der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers 2 stehend ein. Der Abschnitt der Hochfeld-Magnetspule 1 zwischen den beiden Randpunkten 4a, 4b wird als
- 30 Überführungsbereich 5 bezeichnet. Der bandförmige Supraleiter 3 in der zweiten Orientierung 3b kann leicht aus dem Hochfeld-Bereich der Hochfeld-Magnetspule 1 herausgeführt werden, insbesondere durch ausreichenden

Abstand vom Zentrum der Hochfeld-Magnetspule 1 in z-Richtung. Joints können daher im quasi feldfreien Raum angeordnet werden und begrenzen die Leistungsfähigkeit der Hochfeld-Magnetspule 1 nicht.

- 5 Die Führung des bandförmigen Supraleiters 3 im Überführungsbereich 5 erfolgt durch die Nut 6. In Fig.2 ist die Nut 6 zur besseren Veranschaulichung erheblich breiter als der bandförmige Supraleiter 3 dargestellt. In der Realität werden die Seitenflächen der Nut 6 die Außenkanten des Supraleiters 3 berühren. Außerdem ist hier die Nut 6 mit einem in einer Zylindermantelfläche verlaufendem Boden gezeigt. Der bandförmige Supraleiter 3 wird in dieser Nut 6 gleichmäßig verlegt und anschließend vergossen. Die Nut 6 kann wahlweise auch mit abkippendem Boden gefertigt werden, so dass der Winkel zwischen diesem und der lokalen Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers 2
- 10

bestimmt wird gemäß
$$\varphi(u) = \tau \int_0^u d\hat{u} \sqrt{1 + z'(\hat{u})^2}$$

- 15 Der bandförmige Supraleiter 3 liegt dann flach am Boden der Nut 6 an.

- Die Bahnkurve des bandförmigen Supraleiters 3 folgt dabei einem solchen Verlauf, dass die kritischen Materialparameter des bandförmigen Supraleiters 3, insbesondere der minimale Biegeradius r_{\min} über die breite Seite sowie die
- 20 maximal zulässige Torsion τ_{\max} , beachtet werden. Dies geschieht bevorzugt dadurch, dass die Bahnkurve des bandförmigen Supraleiters 3 erfindungsgemäß berechnet wird. Sodann kann ein Verlauf des bandförmigen Supraleiters entsprechend dem berechneten Zusammenhang von axialer Koordinate z und Umfangskoordinate u sowie Winkel φ eingestellt werden. Die
- 25 Umfangskoordinate u entspricht dabei einer Längenkoordinate l projiziert auf eine Ebene senkrecht zur z-Richtung. Als Koordinatenursprung wird einer der Randpunkte 4a oder 4b gewählt; in der Fig. 2 wurde der Randpunkt 4a als Koordinatenursprung gewählt.

30

Ein Verfahren zur Berechnung des räumlichen Verlaufs eines bandförmigen

- Supraleiters 3 einer solenoidförmigen Spulensektion einer Hochfeld-Magnetspule 1 in einem Überführungsbereich 5, ist dadurch gekennzeichnet, dass der bandförmige Supraleiter im Überführungsbereich von einer ersten Orientierung 3a tangential flach anliegend an der Oberfläche eines
- 5 zylindrischen Spulenkörpers 2 und näherungsweise senkrecht zur Längsrichtung des zylindrischen Spulenkörpers verlaufend in eine zweite Orientierung 3b mit seiner Schmalseite auf der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers stehend und parallel zur Längsrichtung verlaufend übergeführt wird oder umgekehrt, und dass aus der Integro-
- 10 Differentialgleichung

$$\frac{z''(u)}{(1 + z'(u)^2)^{3/2}} = - \frac{\sin(\tau \int_0^u d\hat{u} \sqrt{1 + z'(\hat{u})^2})}{r_{\min}}$$

- eine Bahnkurve $z(u)$ bestimmt wird, mit z : axiale Koordinate; u : Umfangskoordinate; \hat{u} : Hilfskoordinate; τ : konstante Torsion im Überführungsbereich; r_{\min} minimalen Biegeradius des bandförmigen
- 15 Supraleiters, und wobei die Position $z=0$, $u=0$ einem Randpunkt 4a, 4b des Überführungsbereichs zugeordnet ist. Dadurch wird eine Leiterführung eines spröden bandförmigen Supraleiters zu einer solenoidförmigen Spulensektion in axialer Richtung in kompakter Bauweise ohne Joints ermöglicht.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Berechnung des räumlichen Verlaufs eines bandförmigen Supraleiters (3) einer Spulensektion einer Hochfeld-Magnetspule (1) in einem Überführungsbereich (5) von der Spulensektion weg oder in die Spulensektion hinein, wobei die Spulensektion solenoidförmig auf einem zylindrischen Spulenkörper (2) gewickelt ist,

dadurch gekennzeichnet,

dass der bandförmige Supraleiter (3) im Überführungsbereich (5) von einer ersten Orientierung (3a) tangential flach anliegend an der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers (2) und näherungsweise senkrecht zur Längsrichtung des zylindrischen Spulenkörpers (2) verlaufend entlang einer Bahnkurve in eine zweite Orientierung (3b) mit seiner Schmalseite auf der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers (2) stehend und parallel zur Längsrichtung verlaufend übergeführt wird oder umgekehrt, und dass aus der Integro-Differentialgleichung

$$\frac{z''(u)}{(1+z'(u)^2)^{3/2}} = \frac{\sin(\tau \int_0^u \hat{u} \sqrt{1+z'(\hat{u})^2} d\hat{u})}{r_{\min}}$$

die Bahnkurve $z(u)$ bestimmt wird,

wobei z die Koordinate des bandförmigen Supraleiters (3) in Längsrichtung des Spulenkörpers und u die Umfangskoordinate des bandförmigen Supraleiters (3) ist, wobei \hat{u} eine Hilfskoordinate darstellt, τ eine über die Länge des bandförmigen Supraleiters (3) im Überführungsbereich (5) konstante Torsion bezeichnet, und r_{\min} den minimalen Biegeradius des bandförmigen Supraleiters (3) über seine breite Seite bezeichnet, und wobei die Position $z=0$, $u=0$ einem Randpunkt (4a) des Überführungsbereichs (5) zugeordnet ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Winkel φ zwischen der flachen Seite des bandförmigen Supraleiters (3) und der lokalen Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers (2) bestimmt wird gemäß

$$\varphi(u) = \tau \int_0^u d\hat{u} \sqrt{1 + z'(\hat{u})^2} .$$

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als τ die maximal erlaubte Torsion τ_{\max} des bandförmigen Supraleiters (3) eingesetzt wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung der Bahnkurve $z(u)$ und/oder die Bestimmung des Winkelverlaufs $\varphi(u)$ mit numerischen Methoden erfolgt.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als Anfangsbedingungen $z(0)=0$ und $z'(0)=0$ gewählt werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der minimale Biegeradius r_{\min} des bandförmigen Supraleiters (3) über seine breite Seite mit einem Sicherheitsfaktor $S1$ multipliziert wird, insbesondere $S1 \leq 1,20$, und/oder dass die maximal erlaubte Torsion τ_{\max} mit einem Sicherheitsfaktor $S2$ multipliziert wird, insbesondere $S2 \geq 0,8$.

7. Hochfeld-Magnetspule (1) mit mindestens einer Spulensektion, wobei die Spulensektion mit einem bandförmigen Supraleiter (3) solenoidförmig auf einem zylindrischen Spulenkörper (2) gewickelt ist,

dadurch gekennzeichnet,

dass der bandförmige Supraleiter (3) mindestens einen Überführungsbereich (5) aufweist, in welchem er von einer ersten Orientierung (3a) tangential flach anliegend an der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers (2) und näherungsweise senkrecht zur Längsrichtung des zylindrischen Spulenkörpers (2) verlaufend entlang einer Bahnkurve in eine zweite Orientierung (3b) mit seiner Schmalseite auf der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers (2) stehend und parallel zur Längsrichtung verlaufend übergeführt wird und/oder umgekehrt.

8. Hochfeld-Magnetspule (1) nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Verlauf des bandförmigen Supraleiters (3) näherungsweise einer mittels des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6 berechneten Bahnkurve $z(u)$ bzw. dem berechneten Winkelverlauf $\varphi(u)$ entspricht.

9. Hochfeld-Magnetspule (1) nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Verlauf des bandförmigen Supraleiters (3) durch eine Nut (6) im zylindrischen Spulenkörper (2) fixiert ist, insbesondere im Überführungsbereich (5).

10. Hochfeld-Magnetspule nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Boden der Nut (6) nicht der Verdrehung des Bandes folgt, sondern auf einer Oberfläche eines Zylinders verläuft.

11. Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der bandförmige Supraleiter (3) einen Hochtemperatur-Supraleiter (=HTSL) umfasst.

12. Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Hochfeld-Magnetspule (1) mindestens eine weitere, radial weiter außen gelegene Spulensektion umfasst.
- 5 13. Hochfeld-Magnetspule (1) nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die radial äußere(n) Spulensektion(en) die radial innere(n) Spulensektion(en) jeweils in axialer Richtung überragt/überragen.
- 10 14. Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass der minimal zulässige Biegeradius r_{\min} des bandförmigen Supraleiters (3) von der Größenordnung des Radius r_0 des zylindrischen Spulenkörpers (2) der radial innersten Spulensektion ist.
- 15 15. Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Hochfeld-Magnetspule (1) zur Erzeugung einer magnetischen Induktionsstärke > 20 T ausgelegt ist.
- 20 16. Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Betriebstemperatur etwa gleich oder kleiner 4 K, insbesondere etwa 2 K ist.
- 25 17. Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass alle Spulensektionen in Serie geschaltet sind.
- 30 18. Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass im Betrieb alle Spulensektionen im Dauerstrommodus betrieben werden.
19. Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass alle Spulensektionen, die keine HTSL enthalten, in Serie geschaltet sind.

20. Hochfeld-Magnetspule (1) nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass eine Vorrichtung vorgesehen ist, um die den HTSL enthaltende Spulensektion mit einem separatem Netzgerät zu betreiben.

5 21. Supraleitfähige Leiterstrukturen umfassendes NMR (=Kernspinresonanz) - Hochfeld - Magnetspulensystem zur Erzeugung eines homogenen Magnetfelds B_0 in einem Messvolumen, dadurch gekennzeichnet, dass das Magnetspulensystem eine Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 20 umfasst.

10

22. Vorrichtung zur Herstellung einer Hochfeld-Magnetspule (1) nach einem der Ansprüche 7 bis 20 mittels des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung einen Computer zur Berechnung des Verlaufs des bandförmigen Supraleiters (3) umfasst.

15

23. Vorrichtung nach Anspruch 22 zur Herstellung einer Hochfeld-Magnetspule (1) nach den Ansprüchen 8 und 9, dadurch gekennzeichnet, dass eine Fräs- oder Erosionseinrichtung zur Computer gesteuerten Erzeugung der Nut (6) im zylindrischen Spulenkörper (2) vorgesehen ist.

20

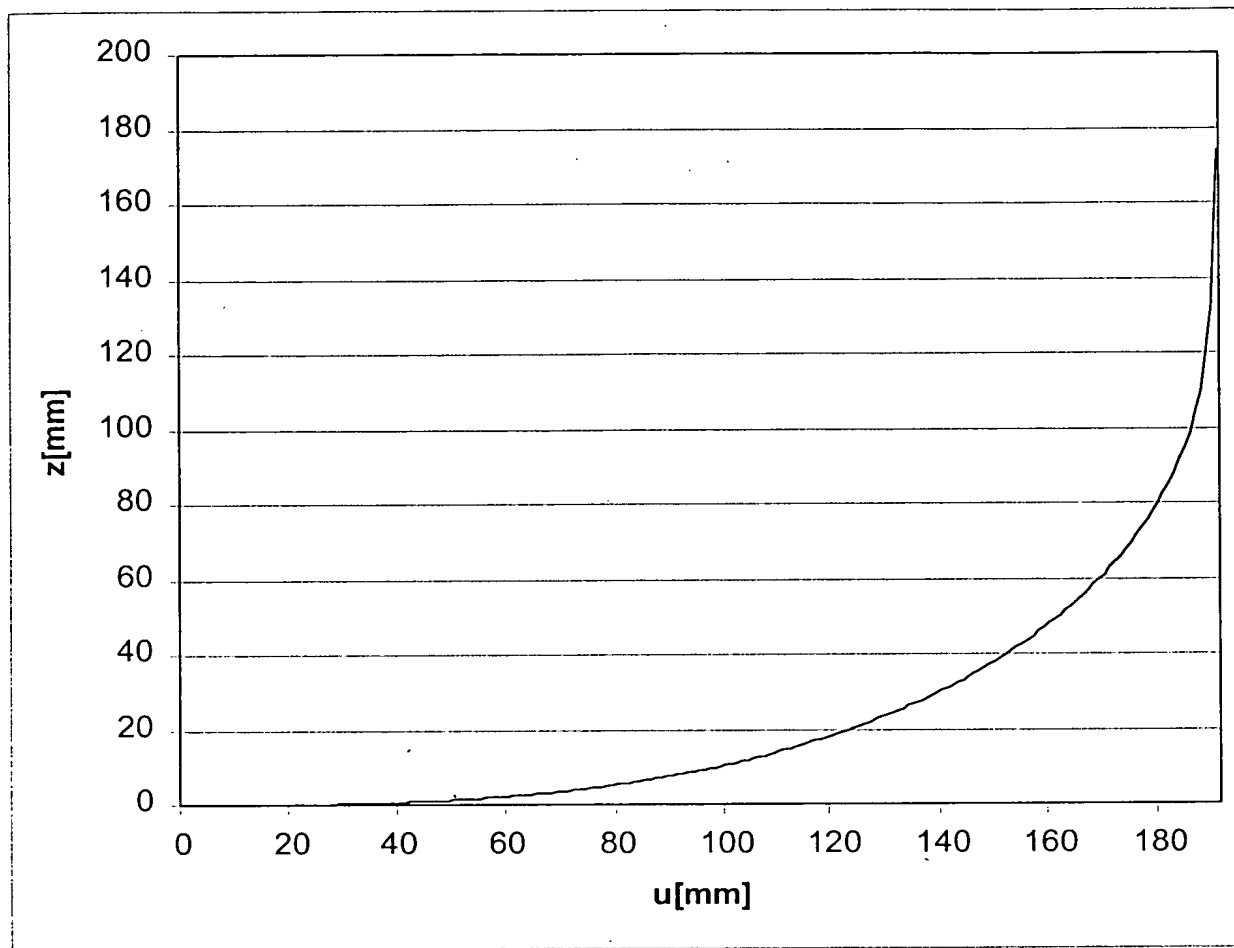


Fig. 1

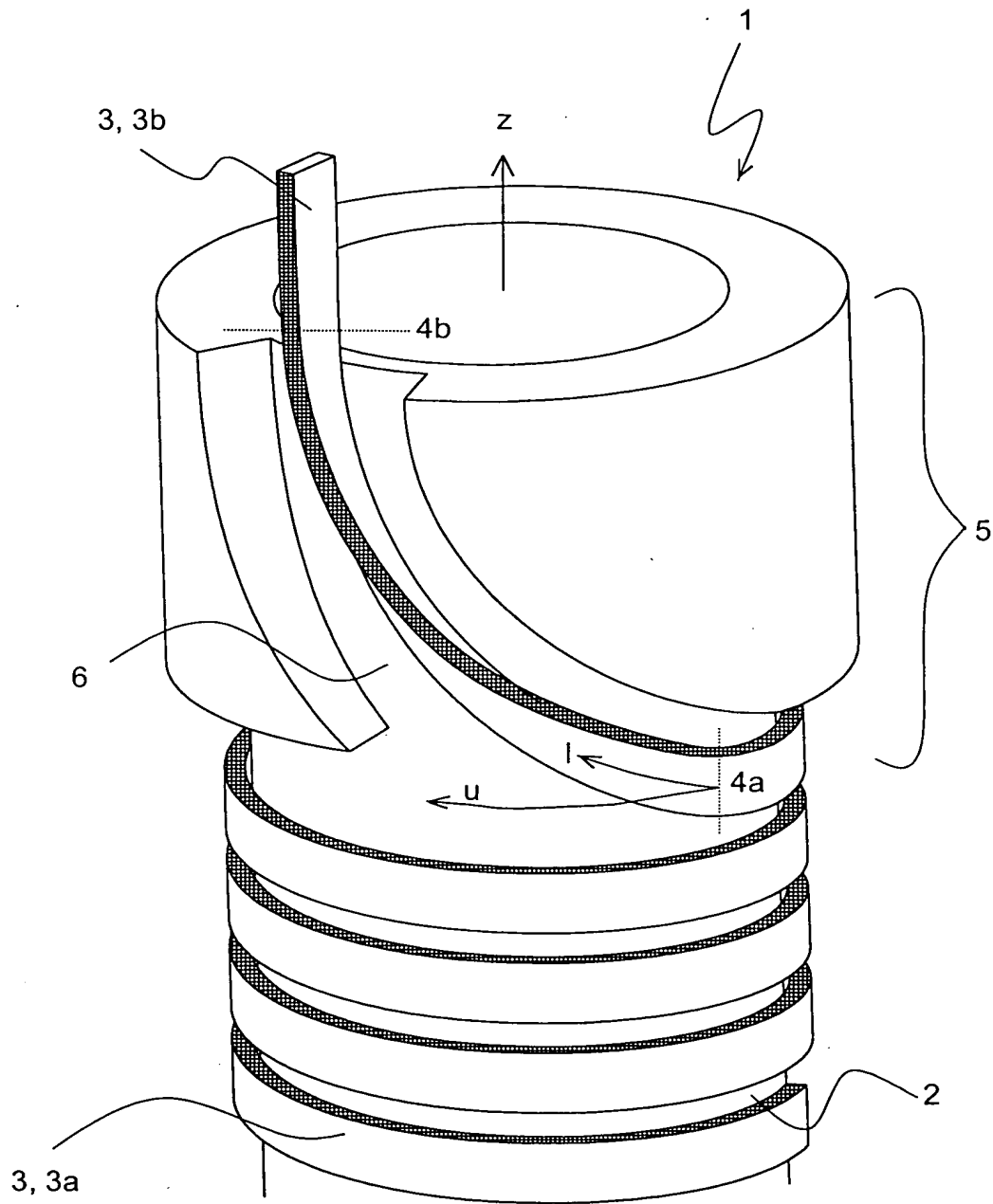


Fig. 2

Zusammenfassung

Ein Verfahren zur Berechnung des räumlichen Verlaufs eines bandförmigen Supraleiters (3) einer solenoidförmigen Spulensektion einer Hochfeld-

- 5 Magnetspule (1) in einem Überführungsbereich (5), ist dadurch gekennzeichnet, dass der bandförmige Supraleiter im Überführungsbereich von einer ersten Orientierung (3a) tangential flach anliegend an der Oberfläche eines zylindrischen Spulenkörpers (2) und näherungsweise senkrecht zur Längsrichtung des zylindrischen Spulenkörpers verlaufend in eine zweite
- 10 Orientierung (3b) mit seiner Schmalseite auf der Oberfläche des zylindrischen Spulenkörpers stehend und parallel zur Längsrichtung verlaufend übergeführt wird oder umgekehrt, und dass aus der Integro-Differentialgleichung

$$\frac{z''(u)}{(1 + z'(u)^2)^{3/2}} = \frac{\sin(\tau \int_0^u d\hat{u} \sqrt{1 + z'(\hat{u})^2})}{r_{\min}}$$

eine Bahnkurve $z(u)$ bestimmt wird, mit z : axiale Koordinate; u :

- 15 Umfangskoordinate; \hat{u} : Hilfskoordinate; τ : konstante Torsion im Überführungsbereich; r_{\min} minimalen Biegeradius des bandförmigen Supraleiters, und wobei die Position $z=0$, $u=0$ einem Randpunkt (4a) des Überführungsbereichs zugeordnet ist. Dadurch wird eine Leiterführung eines spröden bandförmigen Supraleiters zu einer solenoidförmigen Spulensektion in
- 20 axialer Richtung in kompakter Bauweise ohne Joints ermöglicht.

(Fig. 2)

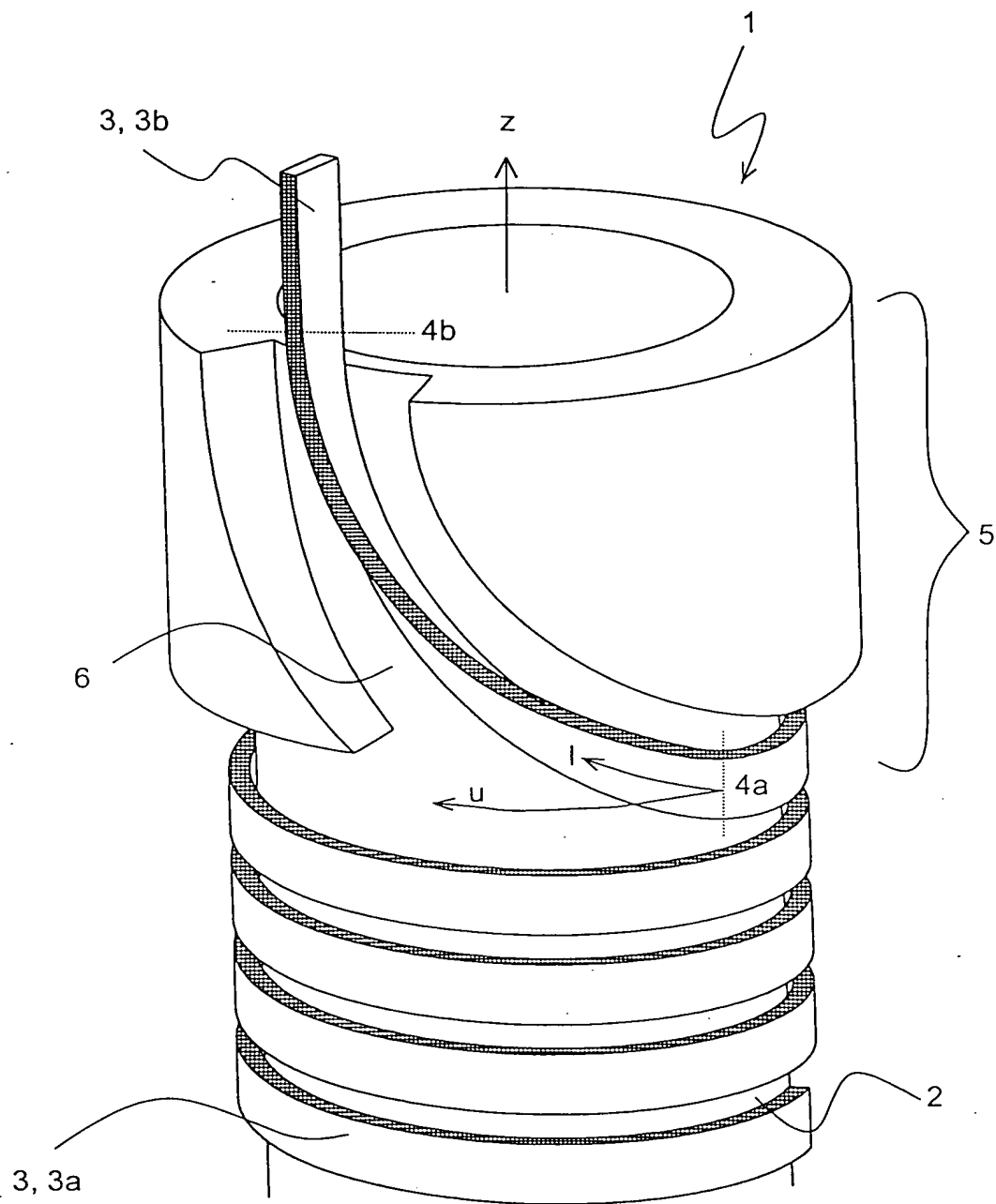


Fig. 2